

Study for inspections of the superconducting cavities in Kyoto University

Hiromu Tongu^{A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Masahiro Ichikawa^{A)}
Hitoshi Hayano^{B)}, Ken Watanabe^{B)}, Yasuchika Yamamoto^{B)}

^{A)} Institute for Chemical Research Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan 305-0801

Abstract

The temperature mapping (T-map) system for inspection of cavity interior surface is developed for the vertical test. T-map system can find heat sources that may be caused by defects on the superconducting cavity. The purpose of our studies on T-map is to realize a high special resolution and easy installation of the sensors. The production yield of such cavities would be improved by using such a high resolution T-map system. The preliminary test of cryogenic temperature by the T-map system is reported.

京大における超伝導空洞の品質検査のための研究

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) の第1期計画では平均加速勾配35MV/mのニオブ製超伝導加速空洞 (図1) が採用され、約15000台の加速空洞が製作される計画である。製作数量が多いため生産効率をあげる必要があり、日本、アメリカ、ヨーロッパで空洞生産のための研究が進められている。京都大学化学研究所では高エネルギー加速器研究機構 (KEK) との共同研究で超伝導加速空洞の欠陥検査についての研究を行っている。

2. 研究目的

超伝導空洞の開発現場では加速空洞に高周波電力を注入して行う縦測定試験 (図2) を行い、到達加速勾配を測定して空洞の良否を判定している。加速勾配の上限は空洞内の表面またはそれに近い内部の状態に大きく依存していると考えられ、平均加速勾配35MV/mを実現するためには空洞開発、製作において非破壊欠陥検査によるミクロンオーダーでの空洞の内表面管理は必要不可欠となっている。製作工程または性能試験工程における空洞内面の欠陥検知により加速空洞の性能低下の原因、欠陥場所を特定し、効率的に対処することができる。本研究ではこの欠陥検査技術の開発とその実用化を進め、ILC加速空洞の生産において歩留まりの向上に生かすことを目的としている。

加速空洞内を観察、検査を行う方法として図3の高分解能小型カメラを用いた観察装置 [1] が京都大学とKEKで共同開発され利用されている。この光学的観察と加速空洞に高周波電力を注入して行う縦測定試験での空洞外壁の温度上昇測定により欠陥の存在が明らかになった。加速勾配を制限する原因の1つは空洞内面に付着した数ミクロンのゴミやキズ、数百ミクロンの凹凸などの欠陥による局所的熱源からのクエンチである。十分な密度の多点温度測定による温度マッピング (T-map) ができれば発熱場所の光学的観察を行い、空洞内表面の欠陥を確定する

ことが容易となる。また、電界放出電子によるX線放射量の測定も欠陥検査の重要な情報となる。しかし、この温度マッピングおよびX線マッピングは単純ではあるが実装が大変なシステムである。さらに京都大学では加速空洞成形前のニオブ板の欠陥検査が行える図4の過流探傷装置や中性子イメージングによる精密非破壊検査についての研究も行っている。

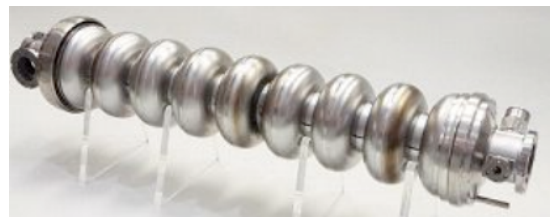


図1 ニオブ製9セル超伝導加速空洞

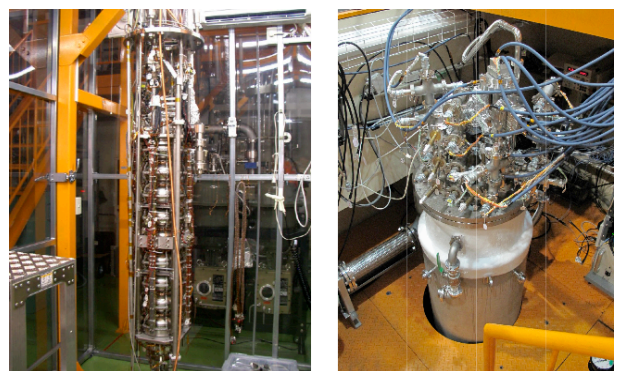


図2 高エネルギー加速器研究機構での縦測定

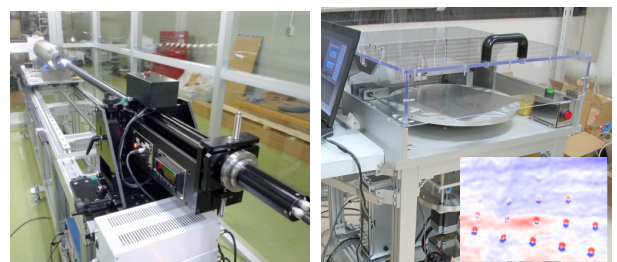


図3 高分解能観察装置

図4 過流探傷装置

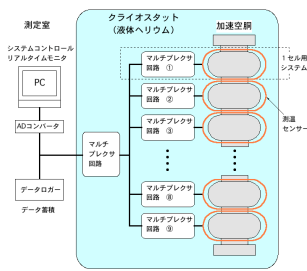


図5 T-mapシステム

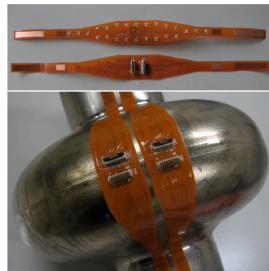


図6 試作センサー基盤

本報告では主に加速空洞の縦測定において非破壊検査を全セル同時、かつ手軽に運用できるT-mapシステムの開発状況とそのシステム検証の測定結果を示す。

3. T-map

本研究のT-mapシステム（図5）の特徴である超多点測定（センサー高密度化）と簡便実装を実現するために温度センサーに面実装チップ抵抗を使用し、短冊状フレキシブル基盤を用いて空洞外壁に接触させる方式を採用した（図6）。このセンサー高密度化により測温感度と測定位置精度の向上、さらに容易に装備できるデバイスにより空洞内表面の欠陥検査時間の短縮が期待できる。

縦測定において加速空洞の内面温度を外表面にて測定するため、温度センサーを液体ヘリウム環境に置かなければならない。空洞の壁厚、熱伝導等より1点/cm²程度のセンサー密度を想定すると9セルで約1万個のセンサーを使用することになる。この超多点測定を行うためのセンサー配線によって極低温環境の熱流入や真空部品のコストアップが考えられる。そのため図5に示すようにCMOSのアナログマルチプレクサ及びシフトレジスタによるチャンネル切替回路をクライオスタット内に設置し、測定室と極低温環境との入出力ケーブルを減らし、熱リークを大幅に減らすことができる。

極低温測定において市販のセンサーは測温性能については申し分ないが、非常に高価であり本研究の多点測定による温度分布計測に用いるのは難しい。現在、超伝導温度を測定する安価な温度センサーとして実績のあるアーレンブラッドレー社の炭素抵抗が利用されている[2]。しかしながらこの炭素抵抗はすでに製造中止となり、多くの研究機関は流通在庫品を使用しているのが現状である。この炭素抵抗に代わる温度センサーとして我々は小型で入手容易な酸化ルテニウムのチップ抵抗を採用した。

4. 測定結果

酸化ルテニウムチップ抵抗の温度センサーとしての性能は我々の初期調査で図7に示すように超伝導域の4.2Kから1.6Kの温度変化に対する感度（出力電圧比：1.6K/4.2K）で10kΩより小さい値では1.5倍、10kΩ以上では2～2.5倍という結果を得た。抵抗値が大きいほうが感度は良いが、大きな抵抗値では時

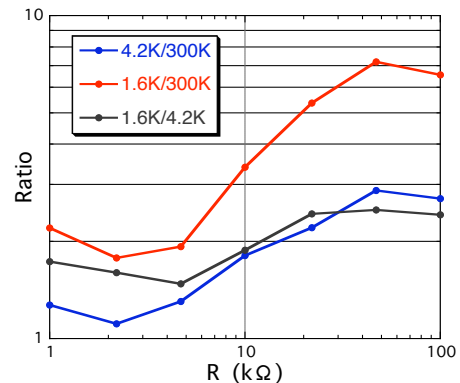


図7 超伝導環境における酸化ルテニウム抵抗の温度感度

定数が大きくなり立ち上がりの信号出力がなまってしまう。これはセンサーの自己発熱の影響などを含めた電流電圧特性の非線形性が効いていると思われる。これらのことから10kΩチップ抵抗を中心に抵抗選択の調査を進めてきた。昨年度からKEKでの9セル縦測定の際に行った図6のセンサー基盤を用いたT-mapシステム動作試験と同時にセンサー性能試験と計測システムの極低温環境での動作確認も進めてきた[3]。我々のT-mapシステムの肝となるセンサーチャンネル切替えについてはテスト用マルチプレクサ回路を用いた測定結果からチャンネル切替え周波数は1kHz（1セル1000点測定を1sec）が限界であり、入力電流については出力信号のSN比と抵抗の自己発熱から5～20μAが妥当と考えられる。

上記の試験で使用している酸化ルテニウム抵抗の極低温での温度感度はアーレンブラッドレー社の炭素抵抗（100Ω）と比べて1/5ほどであり[4]、温度センサーとして使用は可能であるが十分とは言えない。多くの抵抗メーカーでは酸化ルテニウムなどの面実装チップ抵抗は220K程度までの性能保証、性能調査のみで、低温域での性能については測定を行っていない。極低温環境では酸化ルテニウムに混ぜる微量原料により特性が大きく異なり、より温度感度の高いセンサー選定のためにはメーカーや抵抗値、さらには測定条件の違いによる性能比較の調査が必要と考えられる。今回、温度センサーとしての酸化ルテニウム抵抗の抵抗値、入力電流、抵抗体メーカーの違いによる温度特性を測定した。

同じメーカー（KOA）の1k、3.3k、10k、30kΩの室温から約1.7Kまでの抵抗値の測定結果を図8に示す。前回までの測定結果と同様に抵抗値の大きいものほど感度（抵抗値変化量）が良く、入力電流が大きいほど出力信号（電圧）は大きくなるが自己発熱のため20μAでは5μAと比べ感度が下がる。これは感度の高い極低温域、大抵抗値で顕著に現れている。T-mapセンサーとして重要な超伝導域での温度感度を明確にするため図9に4.2Kの抵抗値で標準化したデータを示す。超伝導域での30kΩ抵抗では温度感度の増加が鈍り、感度増加率は10kΩ抵抗がほぼピークのように見える。これにより10kΩ抵抗の採用が妥当と考えられる。

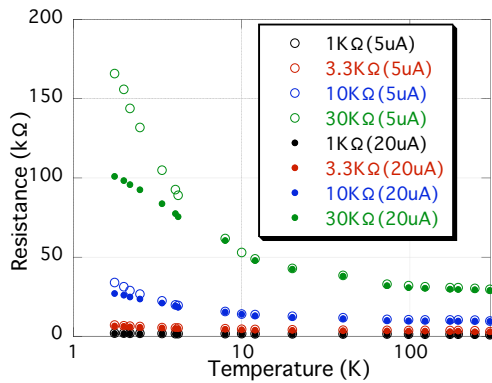


図8 低温での抵抗値変化
KOAのチップ抵抗を使用。()内は入力電流。

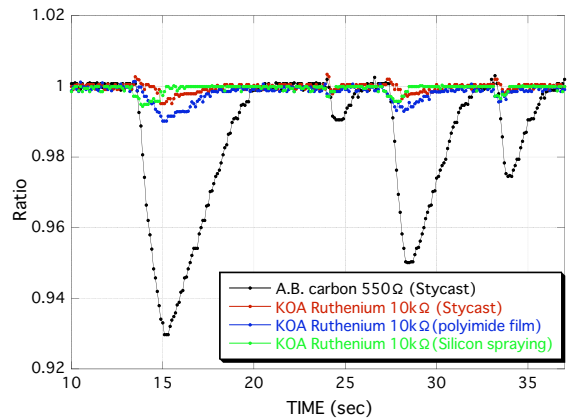


図10 温度センサーの反応速度

アルミ板にT-map用センサーを取付けその裏面に設置したヒーターで仮想クエンチを起こし、感知速度を測定した。()内はアルミ板とセンサー間の電気絶縁材。KEKで使用しているアーレンブラッドレー社 (A. B.) の炭素抵抗に比べ酸化ルテニウム抵抗の感度は悪いが熱に対する反応速度はほぼ同等である。ただし炭素抵抗、酸化ルテニウム抵抗への入力電流はそれぞれ10 μA、100 μAで出力信号サンプリングレートは0.1secである。

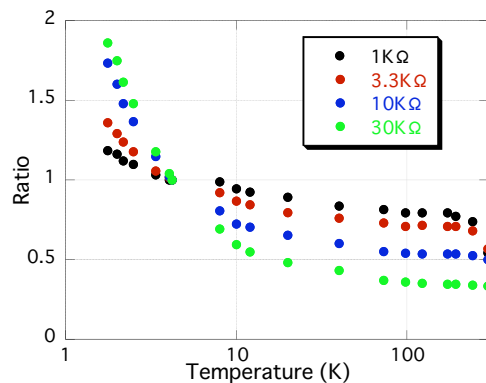


図9 低温での抵抗値変化
図9の入力電流5 μAのデータを4.2Kの測定値で標準化

ヒーターによる仮想クエンチの感知速度の測定結果を図10に示した。KEKで使用しているアーレンブラッドレー社 (A. B.) の炭素抵抗に比べ酸化ルテニウム抵抗の温度感度は悪いが熱に対する反応速度はほぼ同等であり、T-map温度センサーとして十分速いと想われる。また、図10の酸化ルテニウム抵抗変化量は図9より推察すると0.1K以下の温度変化である。

抵抗体メーカー5社の一般的に販売されている面実装酸化ルテニウム抵抗の低温での抵抗値変化を測定した。図11に示すようにメーカーによって抵抗体

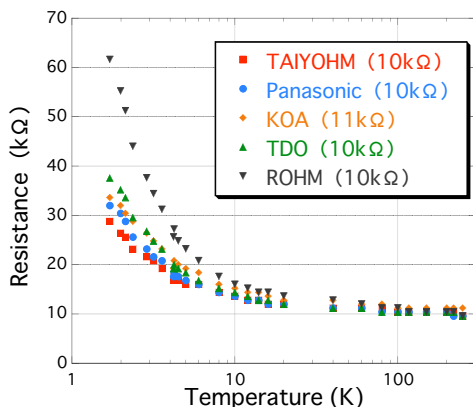


図10 低温での抵抗値変化
入力電流は5 μA.

の低温特性は大きく異なる。

5. まとめ

今回までの測定で酸化ルテニウム抵抗が極低温環境でT-map温度センサーとして使用が可能であることは確認できたがメーカーの違いなどのデータ蓄積が十分ではなく、より高性能のセンサーを採用するために今後もマルチプレクサ回路、アンプの改善と同時にセンサー性能試験も続けて行う。また、1セル (約1000チャンネル) 用T-map測定装置の設計製作を行い、欠陥検査システムとしての計測回路と実装の運用実証試験を行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Iwashita, et al., "Development of high resolution camera for observations of superconducting cavities", Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).
- [2] Balle, Ch., Casas-Cubillos, J. et al, "Influence of Thermal Cycling on Cryogenics Thermometers" in Advances in Cryogenic Engineering 45B, Plenum, New York, 1999, pp. 1817.
- [3] H. Tongu, et al., "Multipoint T-maps for Vertical Test of the Superconducting Accelerator Tubes", Proc. of the 6th Annual Meeting of PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY of JAPAN, (2009) 409-411.
- [4] A. Canabal, et al., "DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE MAPPING SYSTEM FOR 1.3-GHz 9-CELL SRF CAVITIES", Proc. PAC07 2406 - 2408 (2007).